

УДК 571.1: (551.762.3+551.763.1):552.578.3:546.65

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЕ ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО ОСАДОЧНОГО БАССЕЙНА

© 2011 г. Ю. Н. Занин, А. Г. Замирайлова, В. Г. Эдер, В. О. Красавчиков

*Институт геологии нефти и газа СО РАН
630090, г. Новосибирск, просп. акад. Коптюга, 3
E-mail: ZaninYN@ipgg.nsc.ru*

Поступила в редакцию 27.09.2010 г.

Рассмотрено распределение редкоземельных элементов (РЗЭ) в породах черносланцевой баженовской свиты верхней юры (волжский ярус)–нижнего мела (берриасский ярус) Западно-Сибирского морского бассейна. Установлено, что за концентрацию РЗЭ в породах свиты ответственны такие факторы, как состав пород, темп седиментации, окислительно-восстановительный потенциал обстановок формирования отложений. Показано, что глинистые минералы и апатит концентрируют РЗЭ более активно, чем органическое вещество и пирит. При этом глинистые минералы накапливают в повышенном количестве легкие РЗЭ, тогда как органическое вещество и пирит – средние и тяжелые, с той особенностью, что органическое вещество концентрирует Yb и Lu более активно, чем пирит. В некоторых случаях низкое содержание РЗЭ в породах определяется не их составом, а быстрым темпом седиментации. Окислительно-восстановительный потенциал обстановок формирования отложений влияет на содержание РЗЭ в породах в меньшей степени, чем их состав и темп седиментации.

Ключевые слова: *Западная Сибирь, верхняя юра–нижний мел, баженовская свита, черные сланцы, редкоземельные элементы.*

ВВЕДЕНИЕ

Черносланцевые образования являются достаточно широко распространенным типом осадочных пород. Различные аспекты их формирования были рассмотрены рядом авторов [2, 4, 5, 7, 12, 26, 30, 33, 35–38, 42, 45, 47–49 и др.]. Представляется, тем не менее, что не все особенности черносланцевой седиментации анализировались достаточно подробно. Среди нерешенных проблем могут быть названы такие, как роль в концентрации РЗЭ в черных сланцах их минералогического состава, темпа седиментации и окислительно-восстановительного потенциала обстановок формирования. В настоящей публикации авторы обсуждают эти вопросы на примере черносланцевой верхнеюрской–нижнемеловой баженовской свиты Западно-Сибирского морского бассейна, характеризующейся значительным разнообразием состава и обстановок формирования.

Баженовская свита распространена на площади более 1 млн. км² при обычной мощности в пределах 15–30 м, иногда достигающей 60 м [1, 14, 20]. Большинство исследователей свита рассматривается как материнская для богатых залежей нефти Западной Сибири [1, 7–9, 17, 19–21, 29 и др.]. В процессе изучения свиты рядом авторов значительное внимание уделялось анализу закономерностей распределения в ней малых элементов, включая редкоземельные, что нашло отражение во многих публикациях [3, 15, 16, 18, 22, 23, 27, 28, 35 и др.]. Получен-

ные новые материалы существенно расширяют выводы указанных авторов по содержанию и распределению РЗЭ в породах баженовской свиты, закрывая, как можно думать, по крайней мере, некоторые из отмеченных выше пробелов, касающихся черносланцевых отложений в целом.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материал для исследования был подобран по керну скважин, пробуренных в центральной части Западно-Сибирского морского бассейна. Анализ содержания породообразующих компонентов осуществлялся двумя путями. В одних случаях использовался рентгено-флуоресцентный метод, дополняемый для ряда элементов (сера сульфидная, сера сульфатная, СО₂) методами “мокрой химии”, в других – применялись только эти методы. По всем пробам проводилось определение содержания органического углерода. Анализ РЗЭ проводился инструментальным нейтронно-активационным методом с определением содержания La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Yb, Tb, Lu. Чувствительность (предел обнаружения) РЗЭ была равна 0.1 г/т при возможной относительной ошибке 10%.

Анализы были выполнены в Аналитическом центре Объединенного института геологии, геофизики и минералогии СО РАН и в Институте нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, где проводился анализ содержания органического углерода.

Для реконструкции окислительно-восстановительных условий формирования отложений исполь-

зовался анализ форм железа в солянокислой вытяжке с последующим расчетом степени пиритизации железа (СП) по методу Р. Райсвелла и др. [46], восходящему к более ранним разработкам А.В. Гуляевой [6]. Пересчет результатов химических анализов на минералогический состав осуществлялся по методике О.М. Розена и Ю.А. Нистратова [24].

ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗУЧЕННОГО МАТЕРИАЛА

Изучавшиеся образцы были отобраны из скважин, пробуренных в центральной части Западно-Сибирского морского бассейна на площадях Северо-Нивагальской (скв. № 8155), Западно-Котухтинской (скв. № 123), Первомайской (скв. № 2287), Южно-Ярайнерской (скв. № 51); их размещение показано на рис. 1. Всего изучению подвергся 61 образец, характеризующий породы нормальных и аномальных разрезов, выделяемых в составе свиты рядом авторов [7, 13, 31, 49 и др.] (рис. 2). При этом разрезы всех скважин, за исключением скважины № 51 Южно-Ярайнерской площади, рассматриваются как нормальные, сложенные главным образом тонкозернистыми углеродистыми глинисто-кремнистыми породами и силицитами (рис. 3а), иногда фосфатными с содержанием более 1% карбонат-апатита, связанного с обломками

скелетов рыб (рис. 3б), с повышенным содержанием пирита, в небольшой степени – карбонатами, с различным содержанием слагающих их компонентов. Второе место по распространению в нормальных разрезах принадлежит аргиллитам (рис. 3в). Резко подчиненное место занимают карбонатные породы. Для аномальных разрезов (скв. № 51) характерно присутствие пачек, содержащих в повышенных количествах алевритовый материал, наряду с глинистым (рис. 3г), с выделением здесь глинисто-алевроитовых пород и алевритовых аргиллитов. В тоже время, в данной скважине наряду с пачками аномальных пород присутствуют также и пачки, типичные для нормальных разрезов. Породы нормальных разрезов характеризуются медленным или повышенным темпом осадконакопления. К первым относятся глинисто-кремнистые породы, рассматриваемые как умеренно-пелагические образования, ко вторым – аргиллиты, трактуемые в качестве дистальных турбидитов. Породы аномальных пачек рассматриваются в качестве отложений подводных каналов, отвечающих, возможно, подводным каньонам, характеризующимся наиболее высоким темпом седиментации [13, 49].

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Химико-минералогический состав пород

Химические анализы пород нормальных разрезов баженовской свиты выявили существенное различие состава глинисто-кремнистых пород и аргиллитов по содержанию органического углерода (13.64 и 2.75%), Al_2O_3 (8.01 и 17.64%) и серы сульфидной (5.16 и 2.44%). Для пород с повышенным содержанием P_2O_5 (среднее содержание – 2.15%) эти значения составляют, соответственно, 17.10, 9.17 и 7.26%, т.е. близки к наблюдаемым в рядовых (слабофосфатных) глинисто-кремнистых породах со средним содержанием P_2O_5 – 0.25%. Породы аномального разреза характеризуются наиболее низким средним содержанием органического углерода (0.61% в алевритистом аргиллите и 0.24% в глинисто-алевроитовой породе, но в ряде образцов он не выявляется) и сульфидной серы (0.63% – в алевритистом аргиллите и 0–1.09% – в глинисто-алевроитовой породе); содержание Al_2O_3 составляет 10.38% в алевритовом аргиллите и 18.70% – в глинисто-алевроитовой породе.

Содержание SiO_2 в глинисто-кремнистой породе (51.83%) и в аргиллите (54.81%) близки, но соответствуют в этих породах различным минеральным фазам. Пересчет химических анализов на минеральный состав (табл. 1) выявляет, что содержание кварца, глинистых минералов, полевых шпатов составляет в глинисто-кремнистой породе, соответственно, 37.06, 20.66 и 6.50% тогда как в аргилли-

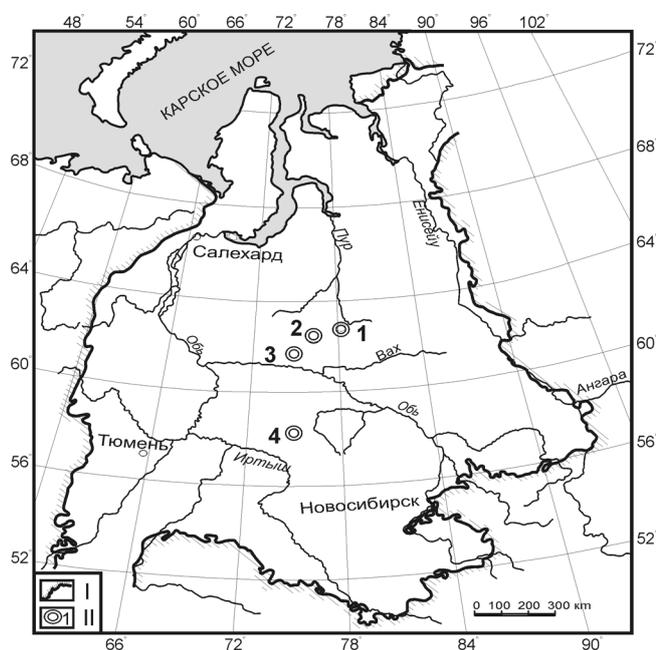


Рис. 1. Расположение изученных скважин.

I – контур Западно-Сибирской геосинеклизы; II – скважины и их номера: 1 – скважина № 51 Южно-Ярайнерской площади, 2 – скважина № 123 Западно-Котухтинской площади, 3 – скважина № 8155 Северо-Нивагальской площади, 4 – скважина № 2287 Первомайской площади.

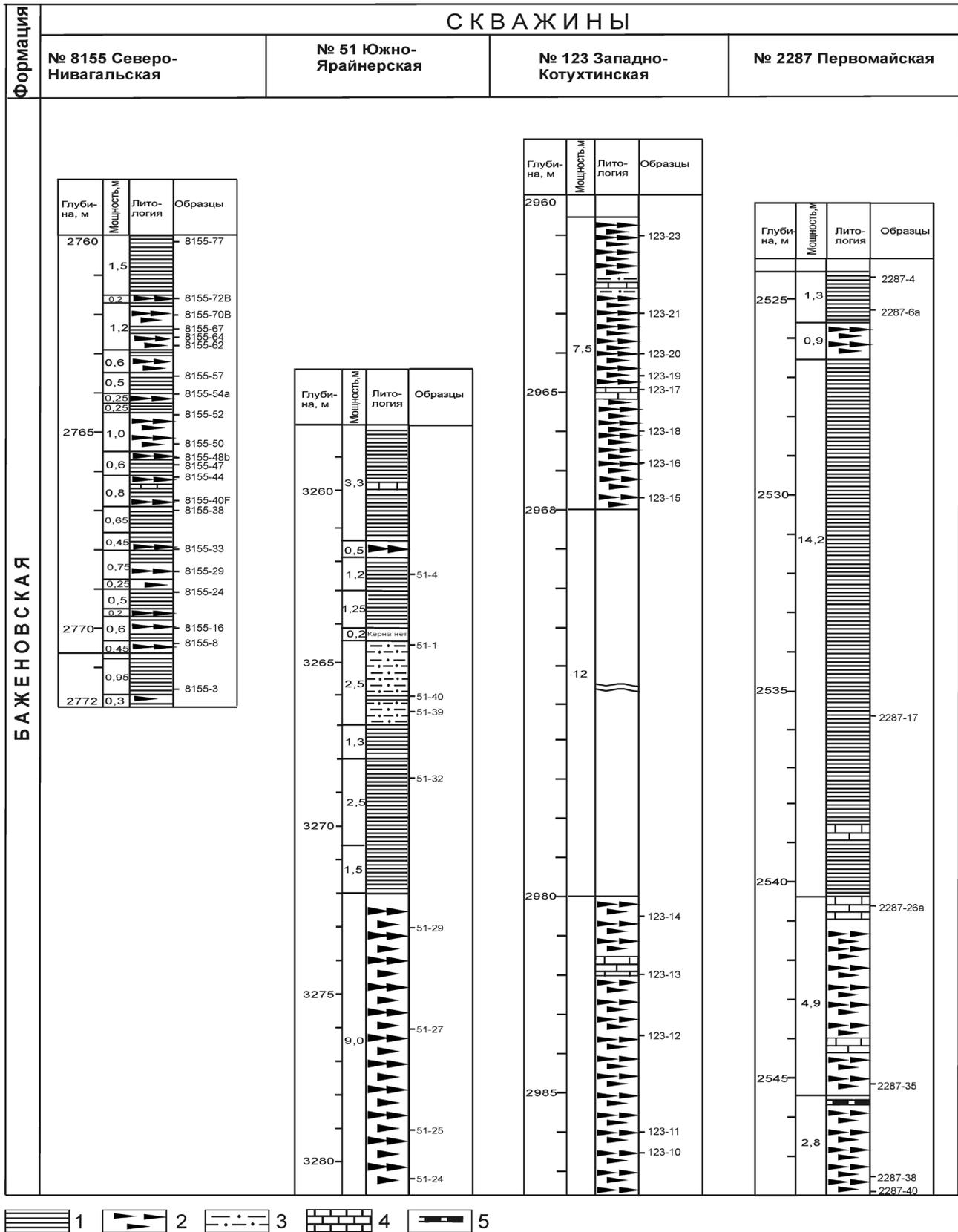


Рис. 2. Схематические литологические колонки баженовской свиты по изученным скважинам.

1 – аргиллиты и алевроитовые аргиллиты, 2 – глинисто-кремнистые породы и силициты, 3 – глинисто-алевритовые породы, 4 – карбонатные породы, 5 – уголь.

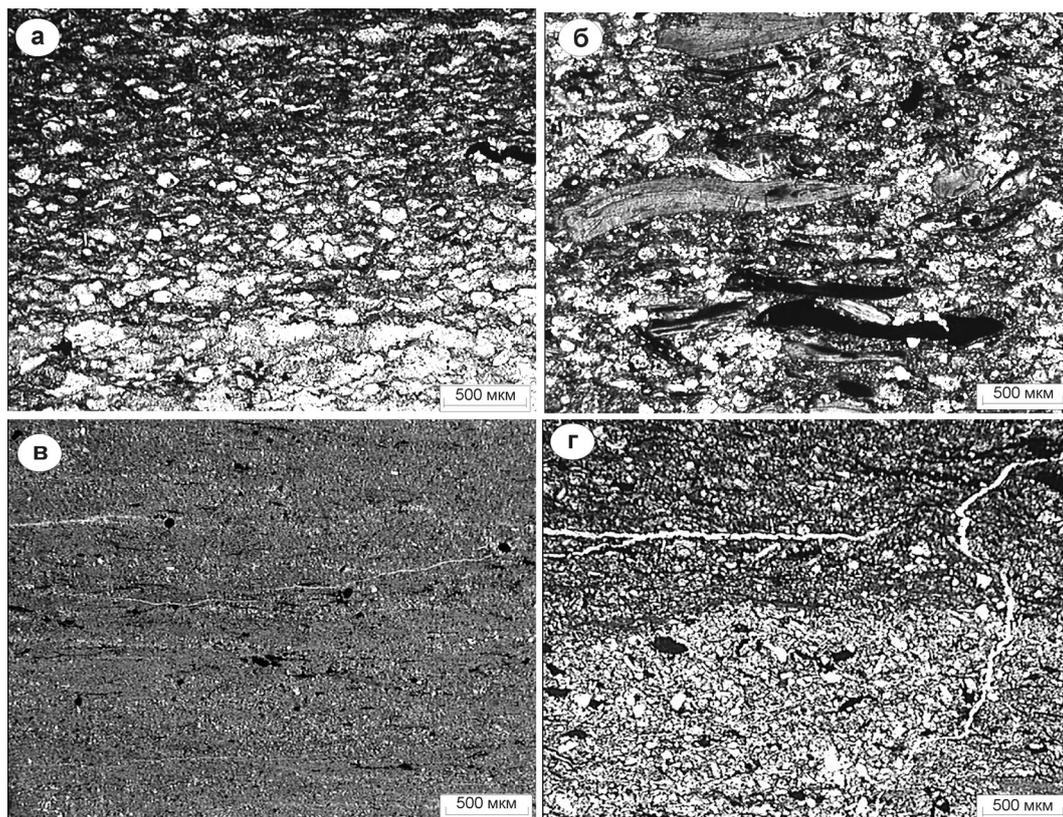


Рис. 3. Главные типы пород баженовской свиты.

а – глинисто-кремнистая порода с реликтами радиолярий, б – глинисто-кремнистая порода с обломками скелетов рыб и реликтами радиолярий, в – аргиллит нормального разреза, г – глинисто-алевритовая порода (нижняя часть рисунка) и алевритовый аргиллит (верхняя часть рисунка) аномального разреза.

те – 24.76, 50.90 и 12.21%. Среднее содержание пирита в породах нормальных разрезов составляет 9.52% – в глинисто-кремнистой породе, 4.48% – в аргиллитах, 5.09% – в карбонатной породе и только 0.97–1.02% – в породах аномальной пачки. Таким образом, в нормальных разрезах существенным отличием глинисто-кремнистых пород от аргиллитов является высокое содержание в первых из них органического углерода, кварца и пирита, но пониженное содержание глинистых минералов. Однако наиболее низкое содержание органического углерода, как и пирита, характеризует породы аномальных пачек. Карбонатные породы нормальных разрезов в основном представлены доломитом, в меньшей степени – известняком, тогда как в породах аномальных разрезов в шлифах и рентгеновским анализом выявляется сидерит.

Состав пород и распределение РЗЭ

Среднее содержание редкоземельных элементов (РЗЭ) в баженовской свите уменьшается по типам пород в следующей последовательности: фосфатные глинисто-кремнистые породы (417.85 г/т) > аргиллиты (140.44 г/т) > глинисто-кремнистые поро-

ды (97.42 г/т) > алевритовый аргиллит аномальной пачки (84.66 г/т) > доломит (26.04 г/т) > глинисто-алевритовая порода аномальной пачки (21.20 г/т) (табл. 2). В черных сланцах различного местоположения и возраста (от верхнедокембрийских до четвертичных) среднее содержание РЗЭ колеблется от 83 до 175 г/т, а среднее содержание в основных типах пород баженовской свиты – глинисто-кремнистых породах и аргиллитах нормальных разрезов – близко к среднему содержанию этих элементов (131.45 г/т) в черных сланцах по Я.Э. Юдовичу и М.П. Кетрис [30] (табл. 3). Породы с повышенным содержанием фосфора в баженовской свите наиболее обогащены РЗЭ. Повышенное содержание этих элементов в фосфатных породах хорошо известно [39, 40]. В баженовской свите содержание апатита в целом очень низкое, но в некоторых образцах достигает 3.04 и 7.13% (табл. 1), и в этих образцах содержание РЗЭ существенно возрастает, достигая соответственно 301.70 и 534 г/т (табл. 2). При этом образцы с повышенным содержанием апатита отвечают лишь глинисто-кремнистым породам, в которых фосфатный материал связан с обломками скелетов рыб (рис. 3б). Но в целом содержание апатита в породах баженовской свиты до-

Таблица 1. Минералогический состав пород баженовской свиты при пересчете химических анализов по методу О.М. Розена и Ю.А. Нистратова [24] и значение степени пиритизации железа (СП)

№ № образцов	Содержание, %								СП
	С _{орг}	кварц	глина	пирит	кальцит	доломит	апатит	полевой шпат	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Глинисто-кремнистые породы и силициты нормальных разрезов									
8155-8	16.69	33.98	20.50	9.99	10.39	0	0.24	4.73	0.94
8155-16	17.30	41.26	22.14	9.22	2.30	0	1.16	5.00	0.94
8155-29	19.06	25.15	25.68	15.58	4.30	9.00	0.500	4.85	0.96
8155-33	14.90	44.11	25.09	8.76	0.10	0	0.57	3.40	0.92
8155-40	28.60	24.49	19.19	17.63	2.20	0	0.33	7.44	0.95
8155-44	17.99	14.94	14.28	9.72	35.6	0	1.48	2.46	0.92
8155-48б	19.30	36.90	25.01	11.63	3.02	0	0.24	4.41	0.95
8155-50	18.19	36.45	20.55	7.61	8.80	0	0.90	7.67	0.94
8155-52	22.50	34.95	19.80	11.7	2.60	0	0.40	3.52	0.93
8155-54А	20.30	29.20	16.34	7.03	18.46	0	0.40	7.03	0.95
8155-64	6.38	21.83	17.06	8.16	37.63	0	0.82	4.72	0.93
8155-70А	18.70	31.12	6.10	6.78	28.42	0	0.40	4.79	0.94
8155-70Б	16.60	31.12	6.10	10.74	28.42	0	0.40	4.79	0.95
8155-72Б	16.30	46.23	19.28	8.76	2.20	0	0.73	3.15	0.94
2287-4	8.43	23.07	30.54	18.21	1.12	4.43	0.54	10.82	0.93
2287-6а	12.10	26.78	25.24	14.90	0.62	4.27	0.43	15.45	0.95
2287-35	12.60	46.13	21.36	7.29	1.22	0	0.68	7.73	0.91
2287-38	15.00	44.51	22.26	8.86	0	7	0.31	6.75	0.93
2287-40	9.20	59.10	8.65	13.43	0.37	1.03	2.15	2.80	0.87
51-24	8.95	38.82	28.04	7.97	2.10	0	0.16	11.37	0.90
51-25	12.65	39.61	22.68	7.80	2.50	0	0.21	11.76	0.88
51-27	12.48	42.82	28.79	8.04	2.40	0	0.28	2.52	0.87
51-29	10.64	37.49	26.79	6.02	3.30	0	1.26	11.00	0.84
123-10	12.04	48.50	19.70	7.80	0.20	2.58	0.17	6.38	0.87
123-11	4.39	51.40	20.11	6.57	1.10	3.50	0.45	11.2	0.88
123-12	9.03	57.21	16.31	6.02	0.90	0	0.61	6.13	0.89
123-13	10.02	48.93	22.61	8.12	0.80	0	0.16	8.12	0.92
123-14	8.69	55.46	20.39	7.00	0.90	0	0.18	5.03	0.88
123-15	11.07	55.66	16.86	6.15	0.60	0	0.30	4.85	0.93
123-16	10.47	22.47	23.79	9.62	23.22	0	0.50	9.62	0.91
123-19	12.93	23.33	22.31	14.67	15.91	0	0.38	7.64	0.95
123-20	10.83	31.80	25.81	9.99	14.21	0	0.79	4.10	0.93
123-21	12.12	45.78	13.55	12.70	7.20	9	0.95	5.06	0.93
123-23	12.68	46.19	15.05	9.65	7.20	9	0.95	5.59	0.91
123-24	8.30	40.57	7.44	8.62	27.22	0	0.55	5.04	0.88
Среднее	13.64	37.06	20.66	9.52	9.15	1.64	0.58	6.50	0.92
Станд. откл.	5.02	12.14	7.39	3.42	12.20	3.01	0.42	3.29	0.03
Фосфатные глинисто-кремнистые породы (P ₂ O ₅ > 1%) нормальных разрезов									
8155-40Ф	Н.д.	24.10	26.20	14.02	8.6	4.50	7.13	5.2	0.95
123-18	17.10	35.50	26.30	12.43	3.28	2.50	3.04	4.5	0.93
Среднее	17.10	29.80	26.25	13.22	5.94	3.50	5.28	4.85	0.94
Станд. откл.	0	8.06	0.07	1.12	3.76	1.41	2.89	0.49	0.01
Аргиллиты нормальных разрезов									
8155-3	1.85	23.71	49.89	7.25	1.01	1.29	0.41	13.51	0.67
8155-7	2.37	24.56	56.70	3.06	0.80	1.84	0.40	9.42	0.45
8155-24	0.85	24.87	54.07	2.64	1.90	0	0.50	14.15	0.36
8155-28	0.87	24.49	48.55	5.22	1.80	0	0.50	17.63	0.73
8155-37	3.02	25.25	50.32	2.51	1.30	0	0.50	15.75	0.41
8155-41	1.20	24.08	50.10	3.20	3.40	н.о.	0.57	16.42	0.92
8155-47	1.78	26.29	54.30	3.06	1.30	0	0.40	11.73	0.51
8155-53	2.11	22.55	47.13	10.2	2.20	0	0.57	14.10	0.85

Таблица 1. Окончание

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8155-57	4.70	22.92	50.47	3.78	3.00	0	0.57	12.88	0.64
8155-62	н.о.	23.90	49.50	3.60	4.20	0	0.50	2.00	0.64
8155-67	1.92	24.15	51.82	3.06	3.00	0	0.50	14.39	0.58
8155-71	3.80	25.86	48.06	3.18	2.10	0	0.58	14.93	0.52
8155-77	0.84	26.35	53.28	2.58	4.20	0	0.40	10.74	0.28
2287-12	1.20	27.47	54.54	2.85	0	1.90	0.40	11.20	0.32
2287-14	3.03	27.66	56.82	3.57	2.74	0.80	0.36	8.97	0.40
2287-21	3.74	21.63	39.06	8.98	3.48	4.47	0.48	17.08	0.76
51-3	1.13	25.73	53.10	2.73	5.20	0	0.61	10.40	0.39
51-4	4.57	25.47	48.99	5.74	1.20	0	0.35	12.04	0.37
51-32	5.79	23.45	50.39	7.83	1.00	0	0.46	4.73	0.69
Среднее	2.70	24.76	50.90	4.48	2.31	0.61	0.48	12.21	0.56
Станд. откл.	1.85	1.60	4.02	2.38	1.37	1.20	0.08	4.01	0.18
Карбонатные породы (доломит) нормальных разрезов									
123-17	2.83	1.72	9.49	2.75	18.32	63.99	0.31	9.62	0.77
2287-26а	3.02	3.92	3.50	7.44	7.60	65.48	0.40	2.51	0.69
Среднее	2.92	2.82	6.49	5.09	12.96	64.73	0.35	5.96	0.73
Станд. откл.	0.13	1.56	4.24	3.32	7.58	1.05	0.06	5.17	0.06
Глинисто-алевроитовые породы аномальных разрезов (пачек)									
51-1	0.30	31.74	22.61	2.04	10.71	13.33	0.40	18.31	0.19
51-39	0.19	26.55	20.44	0	9.91	20.65	0.38	16.23	0
Среднее	0.245	29.14	21.52	1.02	10.31	16.99	0.39	17.27	0.09
Станд. откл.	0.08	3.67	1.53	1.44	0.57	5.18	0.01	1.47	0.13
Алевроитовый аргиллит аномальных разрезов									
51-40	0.61	29.89	51.21	0.97	1.9	0	0.59	13.55	0.20

вольно однообразно (среднее содержание: 0.58% – в глинисто-кремнистых породах и 0.48% – в аргиллитах) и его влияние на содержание РЗЭ незначительно, особенно принимая во внимание, что в глинисто-кремнистых породах содержание апатита выше, чем в аргиллитах, а содержание РЗЭ – ниже.

Аргиллиты нормальных разрезов занимают в баженовской свите второе место по концентрации РЗЭ (140.44 г/т), заметно превосходя по этому показателю глинисто-кремнистые породы (97.42 г/т), что может быть связано с повышенным содержанием в аргиллитах глинистых минералов по сравнению с глинисто-кремнистыми породами (50.90% и 20.66%, соответственно (табл. 1). Что касается пород аномальных разрезов, то в условиях очень низкого содержания в них органического углерода, пирита и апатита, ведущая роль глинистых минералов в концентрации РЗЭ едва ли может быть поставлена под сомнение. Сорбция РЗЭ глинистыми минералами была обоснована А. Милодовским и Дж. Заласиевичем [42] и Ф. Коппином и др. [32]. Ранее повышенное содержание РЗЭ в сланцах относительно более грубозернистых пород отмечалось С.Р. Тейлором и С.М. Мак-Леннаном [25]. Глинисто-кремнистые породы занимают по уровню концентрации РЗЭ (97.42 г/т) в баженовской свите третье место. Эти породы обогащены органическим углеродом и пиритом, но содержат значительно меньше глинистых минералов, чем аргиллиты, что было отмечено выше. Очевидно, роль органического

вещества и сульфидов в концентрации РЗЭ в черных сланцах не столь значительна, по сравнению с глинистым материалом, что отмечалось и ранее [47]. **Особенностью аргиллитов является формирование их в менее восстановительных обстановках,** по сравнению с глинисто-кремнистыми породами, как это вытекает из значений степени пиритизации железа (табл. 1), что, в соответствии с представлениями А.В. Дубинина [10], также способствует повышенному содержанию в них РЗЭ.

Оксиды и гидроксиды железа и марганца рассматриваются рядом авторов [10, 42] в качестве концентратора РЗЭ, но пересчет химических анализов пород баженовской свиты на минералогический состав и анализ шлифов не выявили этих компонентов, что отражает восстановительные условия формирования отложений свиты и отвечает представлениям А. Круза с соавторами [33], которые писали (с. 449), что “присутствие заметных количеств оксидов железа в черных сланцах... представляется маловероятным”.

Средние содержания редкоземельных элементов в породах баженовской свиты скрывают их различия между отдельными разрезами и областями, и даже между отдельными интервалами одних и тех же разрезов, хотя их минералогический состав остается сходным. Так, например, содержание РЗЭ понижено в разрезе скважины № 51 в сравнении со скважинами №№ 8155 и 2287. В глинисто-кремнистых породах первой из этих скважин содержание РЗЭ со-

Таблица 2. Содержание РЗЭ (г/т) и величина отношений Ce/Ce* и Eu/Eu* в породах баженовской свиты

№№ образцов	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Yb	Lu	ΣЛРЗЭ	Σ(C+T) РЗЭ	ΣРЗЭ	ΣЛРЗЭ Σ(C+T) РЗЭ	Ce/Ce*	Eu/Eu*	
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Глинисто-кремнистые породы и силлиты нормальных разрезов																
8155-8	17	39	21	5.4	1.33	5.4	0.89	2.6	0.37	82.4	10.59	92.99	7.78	0.97	1.05	
8155-16	20	44	25	6.60	1.60	7.00	1.20	4.60	0.67	96.60	15.07	110.67	6.41	0.93	1.00	
8155-29	20	46	26	6.20	1.65	6.20	0.98	3.30	0.49	98.20	13.62	110.82	7.21	0.95	1.14	
8155-33	20	43	24	6.20	1.54	6.00	1.10	3.30	0.49	93.20	12.43	105.63	7.50	0.93	1.08	
8155-38	21	48	26	5.50	1.21	4.4	0.72	1.95	0.29	100.50	8.57	109.07	11.73	0.97	1.05	
8155-40	33	71	38	9.70	2.70	10.20	1.80	4.80	0.70	151.70	20.20	171.90	7.51	0.95	1.16	
8155-44	21	46	25	5.70	1.4	4.70	0.77	2.70	0.40	97.70	9.97	107.67	9.81	0.95	1.16	
8155-48б	20	43	24	6.00	1.61	6.10	1.10	3.20	0.46	93.00	12.47	105.47	7.47	0.93	1.14	
8155-50	18	41	23	5.80	1.78	6.00	1.00	3.70	0.55	87.80	13.03	100.83	6.74	0.95	1.29	
8155-52	19	43	24	6.10	1.96	6.60	1.11	3.50	0.48	92.10	13.65	105.75	6.75	0.95	1.31	
8155-54А	16	39	23	5.90	1.80	5.80	0.97	3.80	0.58	83.90	12.90	96.85	6.48	0.94	1.32	
8155-64	24	53	27	6.40	1.75	5.80	0.94	3.20	0.50	110.40	12.19	122.59	9.06	0.99	1.23	
8155-70А	21	48	27	6.80	1.82	6.70	1.15	4.60	0.71	102.80	14.98	117.78	6.86	0.95	1.15	
8155-70Б	20	46	24	6.30	1.57	6.10	0.96	2.80	0.41	96.30	11.84	108.14	8.13	0.99	1.08	
8155-72	28	65	34	7.80	2.20	6.90	1.10	3.80	0.60	134.00	8.14	148.40	8.11	0.99	1.29	
2287-4	24	51	27	5.80	1.18	6.00	0.92	2.70	0.38	107.80	11.18	118.98	9.64	0.95	0.85	
2287-6а	21	50	27	6.40	1.42	8.00	0.95	2.80	0.41	104.40	13.58	116.08	7.69	0.99	0.83	
2287-35	32	72	44	9.40	1.98	10.00	1.60	5.06	0.70	157.40	19.34	176.74	8.14	0.90	0.87	
2287-38	19	43	24	6.00	1.24	7.00	1.18	3.40	0.49	92.00	13.31	105.31	6.91	0.95	0.81	
2287-40	25	48	26	6.20	1.08	6.00	1.09	3.40	0.50	105.20	12.07	117.29	8.72	0.89	0.76	
51-24	15.00	20	5.40	1.18	0.32	1.50	0.34	2.80	0.51	41.58	5.47	47.05	7.60	0.95	1.01	
51-25	11.00	18	6.00	1.40	0.42	2.10	0.43	2.90	0.49	36.40	6.34	42.74	7.92	1.02	1.01	
51-27	11.00	21	7.00	2.00	0.56	2.70	0.52	2.42	0.38	41.00	6.58	47.58	6.23	1.12	1.01	
51-29	13.00	20	5.50	1.50	0.42	2.00	0.40	3.73	0.65	40.00	7.20	47.20	5.55	1.04	1.01	
123-10	9.40	22	13.00	3.90	1.00	4.10	0.69	1.90	0.28	48.30	7.97	56.27	6.06	0.93	1.07	
123-11	14.00	27	13.00	4.10	0.88	3.90	0.61	1.60	0.23	58.10	7.22	65.32	8.05	0.95	0.94	
123-12	4.10	6	3.00	0.86	0.25	1.20	0.22	1.54	0.27	13.96	3.48	17.44	4.01	0.81	1.02	
123-13	11.60	24	12.00	3.60	1.00	3.80	0.60	1.70	0.25	51.20	7.35	58.55	6.97	0.97	1.15	
123-14	12.60	24	12.00	3.50	0.90	3.50	0.61	1.80	0.28	52.10	7.35	59.45	7.09	0.93	1.10	
123-15	2.00	5	Н.д.	1.30	0.30	1.60	0.34	1.70	0.28	8.30	4.22	12.52	1.97	-	0.88	
123-16	25	51	27	7.10	1.60	6.80	1.10	2.40	0.34	110.10	12.34	122.44	8.92	0.93	0.99	
123-19	22	48	26	7.10	1.90	8.30	1.30	3.20	0.43	103.10	15.13	118.23	6.34	0.95	1.05	
123-20	30	65	35	9.60	2.70	11.00	1.70	4.00	0.49	138.60	19.89	158.49	6.95	0.95	1.11	
123-21	21	46	24	6.60	2.00	8.50	1.40	3.70	0.51	97.60	16.11	113.71	6.06	0.97	1.12	
123-23	24	51	32	8.90	2.80	10.00	1.70	0.56	0.73	115.9	15.79	131.69	7.34	0.86	1.26	
123-24	1.8	4	Н.д.	0.80	0.20	1.00	0.20	1.20	0.21	6.60	2.81	9.41	2.35	н.о.	0.94	
Среднее	18.80	40.30	21.43	5.44	1.39	5.70	0.94	2.96	0.46	85.97	11.45	97.42	7.51	0.95	1.06	
Станд. откл.	7.56	17.52	10.82	2.48	0.69	2.63	0.41	1.04	0.14	38.38	4.91	43.29	7.82	0.05	0.14	

Таблица 2. Окончание

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
8155-40Ф	108	220.00	117	28.00	7.50	31	5.10	15.20	2.20	473.00	61.00	534.00	7.75	0.93	1.08
123-18	66	115.00	64	17.90	4.60	21	3.60	8.40	1.20	262.90	38.80	301.70	6.78	0.84	1.00
Среднее	87	167.50	90.50	22.95	6.05	26	4.35	11.80	1.70	368.25	49.90	417.85	7.40	0.88	1.04
Станд. откл.	29.70	74.25	37.48	7.14	2.05	7.07	1.06	4.81	0.71	148.57	15.70	164.27	9.46	0.06	0.06
8155-3	29	58	28	5.9	1.23	5.20	0.86	2.30	0.34	120.90	9.93	130.83	12.18	0.97	0.95
8155-7	31	65	29	5.7	1.16	4.50	0.68	2.20	0.31	130.70	8.85	139.55	14.76	1.03	0.98
8155-24	36	76	37	7.3	1.41	6.10	1.10	2.70	0.40	156.30	11.71	168.01	13.35	0.99	0.91
8155-28	36	81	35	6.3	1.15	4.60	0.69	2.10	0.31	158.50	8.85	167.15	17.91	1.08	0.91
8155-37	32	68	32	6.7	1.36	5.50	0.86	2.30	0.33	138.70	10.35	149.05	13.41	1.01	0.96
8155-41	39	85	39	7.3	1.47	5.40	0.89	2.40	0.35	170.30	10.51	180.81	16.14	1.04	1.00
8155-47	21	43	22	5.7	1.40	4.00	0.63	2.30	0.36	91.70	8.69	100.39	10.55	0.95	1.25
8155-53	30	64	29	5.8	1.36	4.10	0.64	2.10	0.32	128.80	8.52	137.32	23.64	1.03	1.19
8155-57	35	75	38	7.1	1.54	5.60	0.85	2.60	0.41	155.10	11.00	166.10	14.10	0.97	1.05
8155-62	42	87	45	9	2.30	7.30	1.10	3.12	0.48	183.00	14.30	197.3	12.80	0.95	1.22
8155-67	37	76	36	6.8	1.37	5.60	0.92	2.40	0.36	155.80	10.65	166.45	14.63	0.99	0.95
8155-71	33	68	32	6.6	1.61	5.40	0.86	3.20	0.48	139.60	11.55	151.15	15.55	0.99	1.16
8155-77	34	70	37	8	1.75	5.90	0.96	2.80	0.43	149.00	11.84	160.84	12.58	0.94	1.09
228712	30	62	30	6.6	1.32	7.00	1.05	3.01	1.41	128.60	13.79	142.73	9.33	0.98	0.83
2287-14	27	53	27	6.6	1.21	6.00	1.02	3.15	0.43	113.60	11.81	125.41	9.62	0.93	0.82
2287-21	31	64	30	6.8	1.33	7.00	1.07	3.15	0.43	131.80	12.98	144.78	10.15	1.00	0.82
51-3	22	33	10	1.6	0.34	н.о.	0.33	2.49	0.40	66.60	3.56	70.16	18.71	0.99	н.о.
51-4	19	27	9	1.45	0.36	н.о.	0.37	2.60	0.42	56.45	3.75	60.20	15.05	0.93	н.о.
51-32	18	28	7.50	1.55	0.39	2.00	0.38	2.66	0.43	55.05	5.86	60.91	9.39	1.06	0.93
Среднее	30	66.81	28.16	5.76	1.21	4.64	0.79	2.62	0.45	124.13	9.93	140.44	12.50	0.99	1.00
Станд. откл.	6.71	18.68	10.58	2.17	0.44	2.18	0.25	0.36	1.26	130.73	9.71	39.98	13.46	0.04	0.14
123-17	2.50	4.40	2.00	0.56	0.09	0.70	0.14	0.84	0.14	9.46	1.91	11.37	4.95	0.93	0.60
2287-26a	7.70	17.70	5.40	2.20	0.30	2.10	0.36	0.84	0.12	37.00	3.72	40.72	9.95	0.98	0.60
Среднее	5.70	1.38	0.51	11.05	19.00	1.40	0.25	0.87	0.13	23.23	2.81	26.04	7.45	0.95	0.60
Станд. откл.	3.68	9.40	3.30	1.16	0.15	0.99	0.15	0.85	0.01	20.77	1.28	20.77	3.53	0.03	0
51-1	7.60	11.00	2.80	0.48	0.19	н.о.	0.12	1.10	0.20	21.88	1.61	(23.49) ^в	13.59	1.00	н.о.
51-39	5.80	9.10	3.10	0.42	0.14	0.53	0.12	1.04	0.17	17.44	1.47	18.91	11.86	0.96	1.29
Среднее	6.70	10.05	2.95	0.45	0.17	0.53	0.12	1.07	0.19	19.66	1.54	21.22	12.73	0.93	н.о.
Станд. откл.	1.13	2.12	0.14	0.03	0.03	0	0	0.07	0.03	3.14	0.10	3.24	1.22	0.10	н.о.
51-40	23	37	12.40	1.54	0.27	1.60	0.36	3.10	0.44	78.70	5.96	84.66	13.20	0.99	0.75

Примечание: ЛРЗЭ – La, Ce, Nd, Sm; (С + Т) РЗЭ – Eu, Gd, Tb, Yb, Lu.

Таблица 3. Среднее содержание редкоземельных элементов (г/т) в черных сланцах некоторых регионов

Регион	Возраст	Формация, свита	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Yb	Lu	ΣРЗЭ	Источники
Западная Сибирь	верхняя юра–нижний мел	баженовская сапропелевые илы	18.80	40.30	21.43	5.44	1.39	5.70	0.94	2.96	0.46	97.42	настоящая статья
	квартер		30.00	66.81	28.16	5.76	1.21	4.64	0.79	2.62	0.45	140.44	
Черное море	верхняя юра–нижний мел	нет данных	19.40	35.40	18.20	3.22	0.92	2.22	0.68	2.28	0.46	82.78	[34]
	Баренцево море		36.90	70.50	37.30	9.30	1.86	7.00	1.20	4.20	0.60	168.86	[4]
Огайо	девон	сланцы Огайо (SDO-1)	38.50	79.30	36.60	7.70	1.60	6.50	1.20	3.40	0.54	175.34	[38]
	верхний карбон	сланцы Muncie Steek формации Iola	20.00	н.о.	16.00	5.60	1.10	4.30	0.58	1.80	0.33	–	[37]
Канзас	верхний карбон	нет данных	33.20	57	23.40	3.84	0.74	н.о.	0.78	2.36	0.39	121.71	[33]
	нижний–средний кембрий		23.38	45.67	24.44	5.43	н.о.	5.14	0.84	2.40	0.35	108.07	[12]
Оклахома	верхний докембрий	нет данных	40.00	59.00	36.00	5.50	1.37	6.20	0.82	3.08	0.43	152.20	[5]
	нижний докембрий		38	62	30	6.9	1.42	6.6	1.0	3.37	0.55	149.84	[5]
Сибирская платформа	верхний докембрий	куонамская свита	28	58	33	5.4	1.2	4.7	0.75	н.о.	0.40	131.45	[30]
Корейский п-ов, депрессия Рхюппат	верхний докембрий	нет данных	28	58	33	5.4	1.2	4.7	0.75	н.о.	0.40	131.45	[30]
Среднее содержание в черных сланцах													

ставляет 47.20–47.58 г/т, тогда как во вторых – колеблется от 92.99 г/т до 176.74 г/т. Для аргиллитов скв. № 51 эти колебания составляют 60.20–70.16 г/т, а для скважин №№ 8155 и 2287 – 125.41–180.81 г/т. В глинисто-кремнистых породах скважины № 123 отмечается три уровня содержаний РЗЭ: 113.71–158.49 г/т, 56.27–65.32 г/т, 9.40–17.44 г/т при сохранении химико-минералогического состава пород (табл. 1, 2). Мы связываем эти вариации в содержании РЗЭ с местными различиями обстановок формирования отложений баженовской свиты.

Темп седиментации и концентрация РЗЭ

В нормальных разрезах темп седиментации материала глинисто-кремнистых пород, рассматриваемых как умеренно гемипелагические, был намного ниже, чем аргиллитов, представляющих собой отложения дистальных турбидитов [13, 49]. Высокое содержание РЗЭ в аргиллитах по сравнению с глинисто-кремнистыми породами указывает, что состав пород (более высокое содержание глинистого материала в аргиллитах) был здесь более важен для концентрации РЗЭ, чем темп седиментации. В противоположность этому, глинисто-алевритовая порода аномального разреза (скважина № 51), по содержанию глинистого материала (21.50 г/т), сопоставима с глинисто-кремнистой породой нормального разреза (20.70 г/т), но содержание РЗЭ в последней (97.40 г/т) намного выше, чем в породе аномального разреза (21.20 г/т). Невозможно связать понижение содержания РЗЭ в глинисто-алевритовой породе с низкими содержаниями органического углерода и пирита (табл. 1, 2). В то же время, породы аномальной пачки (разреза) рядом исследователей рассматриваются как флювиальные отложения каналов с быстрым темпом седиментации [7, 13, 31, 49]. Мы полагаем, что именно быстрая седиментация была причиной низкой концентрацией РЗЭ в глинисто-алевритовых породах аномального разреза, что находится в соответствии с представлениями Р. Муррея и др. [43]. Содержание РЗЭ в алевритистых аргиллитах аномального разреза (84.66 г/т) сравнимо с содержанием их в аргиллитах нормальных разрезов.

Окислительно-восстановительный потенциал и концентрация РЗЭ

Наблюдается следующая последовательность понижения значений степени пиритизации железа (СП), отражающая понижение восстановительного режима формирования пород: 0.94 (фосфатная глинисто-кремнистая порода) > 0.92 (глинисто-кремнистая порода) > 0.73 (доломиты) > 0.56 (аргиллиты) > 0.20 (алевритистый аргиллит аномального разреза) > 0.09, (глинисто-алевритовая порода)

да аномального разреза). Для глинисто-кремнистых пород этот режим был высоко восстановительным, для доломитов и аргиллитов – существенно восстановительным, для аномальных пород – от окислительного до слабо восстановительного.

Хотя СП глинисто-кремнистых пород нормальных разрезов выше, чем аргиллитов, содержание РЗЭ в первых ниже, чем во вторых. Возрастание содержания РЗЭ в аргиллитах относительно глинисто-кремнистых пород сопровождается не только понижением восстановительного режима их формирования, но также возрастанием содержания глинистого материала, и, таким образом, роль окислительно-восстановительных условий в концентрации РЗЭ остается неопределенной. С другой стороны, в скважине № 123 наиболее низкое среднее содержание РЗЭ (обр. 123-12, 123-15, 123-24, глубины, соответственно, 2983.5 м, 2967.8 м, 2962.4 м) составляет 13.12 г/т и наиболее высокое среднее содержание (обр. 123-16, 123-19, 123-20, 123-21, 123-23, глубины, соответственно, 2966.8 м, 2964.6 м, 2964.0 м, 2963.0 м, 2961.0 м) равно 129 г/т, тогда как СП составляет 0.90 и 0.92 в первом и во втором случаях. Едва ли возможно, чтобы столь небольшие различия окислительно-восстановительного режима, выраженные в минимальном различии величины степени пиритизации железа, имели следствием столь существенные различия в концентрации РЗЭ. Эти примеры показывают, что содержание РЗЭ в породах баженовской свиты в меньшей степени контролируется окислительно-восстановительными условиями их формирования по сравнению с минералогическим составом.

Отношение суммы легких РЗЭ к сумме средних и тяжелых

Породы баженовской свиты различны не только по общему содержанию РЗЭ, но и по отношению легких РЗЭ (La, Ce, Nd, Sm) к сумме средних и тяжелых РЗЭ (Eu, Gd, Tb, Eu, Lu). Среднее значение этого отношения для аргиллитов нормальных разрезов составило 13.40, для алевритистых аргиллитов и глинисто-алевритовых пород аномального разреза – 13.2 и 12.7, соответственно, тогда как для глинисто-кремнистых пород – 7.51, фосфатных глинисто-кремнистых пород – 7.37 и карбонатных пород – 7.45 (табл. 2). При этом следует иметь в виду (табл. 1), что аргиллиты существенно обогащены глинистыми минералами по сравнению с глинисто-кремнистыми породами (соответственно, 50.90 и 20.66%), но обеднены органическим углеродом (2.49 и 13.51%) и пиритом (4.48 и 9.52%). Как видно, породы с высоким содержанием глинистого материала и пониженным содержанием органического углерода и пирита (аргиллиты) обогащены легкими РЗЭ по сравнению с породами с более высоким содержанием органиче-

ского углерода и пирита, но низким содержанием глинистых минералов (глинисто-кремнистые породы), которые обогащены средними и тяжелыми элементами (табл. 2). Равным образом, в аномальной пачке глинисто-алевритовые породы и алевритовые аргиллиты характеризуются относительно высоким содержанием легких РЗЭ по сравнению с глинисто-кремнистыми породами нормальных разрезов (табл. 2). Представляется, что глинистые минералы в черных сланцах баженовской свиты предположительно ответственны за концентрацию легких РЗЭ, тогда как средние и тяжелые РЗЭ связаны по преимуществу с органическим веществом и пиритом. Несмотря на различное содержание РЗЭ в конкретных образцах, отношение легких РЗЭ к сумме средних и тяжелых в основных типах пород баженовской свиты (глинисто-кремнистые породы и аргиллиты) в целом сохраняется.

Корреляционный и регрессионный анализы

Корреляционный анализ был применен для подтверждения высказанных выше представлений о связи содержания РЗЭ в породах баженовской свиты с их минеральным составом. Поскольку минеральные компоненты в составе баженовской свиты не имеют нормального распределения [11] и метод парной корреляции здесь использован быть не может, мы применили в этих целях метод ранговой корреляции Спирмена. Проведенный корреляционный анализ глинисто-кремнистых пород и аргиллитов, абсолютно преобладающих в составе баженовской свиты (табл. 4), выявил существенную положительную корреляцию легких РЗЭ с глиной, полевыми шпатами и апатитом. При этом коэффициенты корреляции La и Ce с глиной выше, чем с апатитом и полевым шпатом. Что же касается средних и тяжелых РЗЭ, для них характерна значительная положительная корреляция с апатитом, пиритом и органическим углеродом. Eu проявляет существенную положительную корреляцию с кальцитом. Во всех случаях коэффициенты корреляции средних РЗЭ (Eu, Tb) довольно низки, а тяжелых (Yb, Lu) существенно выше для органического углерода, чем для пирита и апатита. Это находится в соответствии с выводами Л. Тайта [47] о более высокой концентрации тяжелых РЗЭ органическим веществом по сравнению с пиритом.

Уточненный анализ наиболее значимой на статистическом уровне связи редкоземельных элементов с минеральными компонентами баженовской свиты был проведен путем построения регрессионных моделей. Регрессионные модели были построены методом множественной линейной регрессии. Для этой процедуры использовались значения содержания минеральных компонентов, которые при проведенном ранее корреляционном анализе, пока-

Таблица 4. Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена для глинисто-кремнистых пород и аргиллитов нормальных разрезов баженовской свиты

	С _{орг}	кварц	глина	пирит	кальцит	доломит	апатит	полевой шпат	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Yb	Lu
С _{орг}	1																
Кварц	-0.35	1															
Глина	-0.75	-0.46	1														
Пирит	0.67	-0.23	-0.56	1													
Кальцит	0.27	-0.32	-0.20	0.13	1												
Доломит	-0.07	-0.03	-0.03	0.17	-0.23	1											
Апатит	-0.06	-0.09	-0.08	0.10	0.18	0.00	1										
П.ш.	-0.67	-0.31	0.55	-0.37	-0.28	0.09	-0.01	1									
La	-0.47	-0.58	0.45	-0.25	0.07	0.05	0.33	0.38	1								
Ce	-0.35	-0.54	0.36	-0.18	0.08	0.08	0.31	0.32	0.98	1							
Nd	-0.27	-0.44	0.29	-0.14	0.09	0.08	0.32	0.26	0.94	0.98	1						
Sm	0.00	-0.30	-0.06	0.06	0.19	0.08	0.33	0.10	0.79	0.84	0.88	1					
Eu	0.37	-0.18	-0.21	0.30	0.38	-0.01	0.36	-0.20	0.50	0.58	0.60	0.83	1				
Gd	0.33	-0.15	-0.16	0.39	0.16	0.27	0.28	-0.09	0.49	0.53	0.56	0.83	0.82	1			
Tb	0.19	-0.14	-0.13	0.27	0.19	0.36	0.15	-0.14	0.36	0.41	0.39	0.62	0.62	0.73	1		
Yb	0.52	0.28	-0.26	0.35	0.18	-0.19	0.27	-0.24	0.15	0.18	0.15	0.45	0.56	0.62	0.41	1	
Lu	0.52	0.11	-0.31	0.32	0.23	-0.02	0.33	-0.24	0.12	0.14	0.12	0.43	0.57	0.59	0.38	0.81	1

Примечание. Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, соответствующие доверительной корреляции >0,9; образцы фосфатных глинисто-кремнистых пород, обогащенных РЗЭ (8155-40Ф и 123-18), не включены. П. ш. – полевой шпат.

зали наиболее высокую статистическую связь с РЗЭ (табл. 4). Для каждого редкоземельного элемента была построена регрессионная модель, и далее были отобраны модели с оптимальным комплексом минеральных компонентов, при которых наблюдалась наиболее значимая статистическая связь с РЗЭ.

Регрессионный анализ определил следующие статистически значимые связи: **La и Nd** с глиной, апатитом и полевыми шпатами, **Ce** – с глиной, апатитом и полевыми шпатами, **Lu** – с С_{орг} и апатитом, **Yb** с С_{орг} (рис. 4). Для последнего элемента, который имеет статистически значимую связь только с одним минеральным компонентом, было естественным применить бивариантную корреляцию (рис. 4д). Для ряда редкоземельных элементов (**Sm, Eu, Gd, Tb**) регрессионный анализ не показал какой либо статистически значимой связи с минеральными компонентами, тогда как при помощи метода ранговой корреляции Спирмена были определены связи (табл. 4) **Eu, Gd, Tb** с пиритом, и **Eu и Gd** – с органическим углеродом.

Таким образом, корреляционным и регрессионным анализами устанавливается, что глинистые минералы в баженовской свите являются в целом более эффективным концентратором РЗЭ, чем органическое вещество и особенно сульфиды, и в то же время более ответственны за накопление легких РЗЭ, тогда как органическое вещество и, в меньшей степени, сульфиды – тяжелых, что соответствует приводимым в литературе данным [47]. Апатит в случае существенно повышенного содержания его в породе является в баженовской формации наиболее активным концентратором РЗЭ, однако, как отмечено выше, в связи с низким его содержанием, существенного значения на концентрацию РЗЭ в свите в целом он в большинстве случаев не имеет. Для нас было неожиданным выявление положительной статистически значимой связи La и Ce методом ранговой корреляции или только Ce методом регрессионного анализа с полевым шпатом. При этом относительная роль полевых шпатов в концентрации РЗЭ в баженовской свите остается неопределенной.

Особенности нормализации РЗЭ баженовской свиты по сланцам

На нормализованных по сланцам NASC [44] графиках содержаний РЗЭ в глинисто-кремнистых породах наблюдается возрастание их значений от легких РЗЭ к тяжелым (рис. 5а, б), тогда как в аргиллитах наблюдается обратный тренд, в меньшей степени выраженный на рис. 5в и в большей – на рис. 5г. Во всех случаях эти породы характеризуются от-

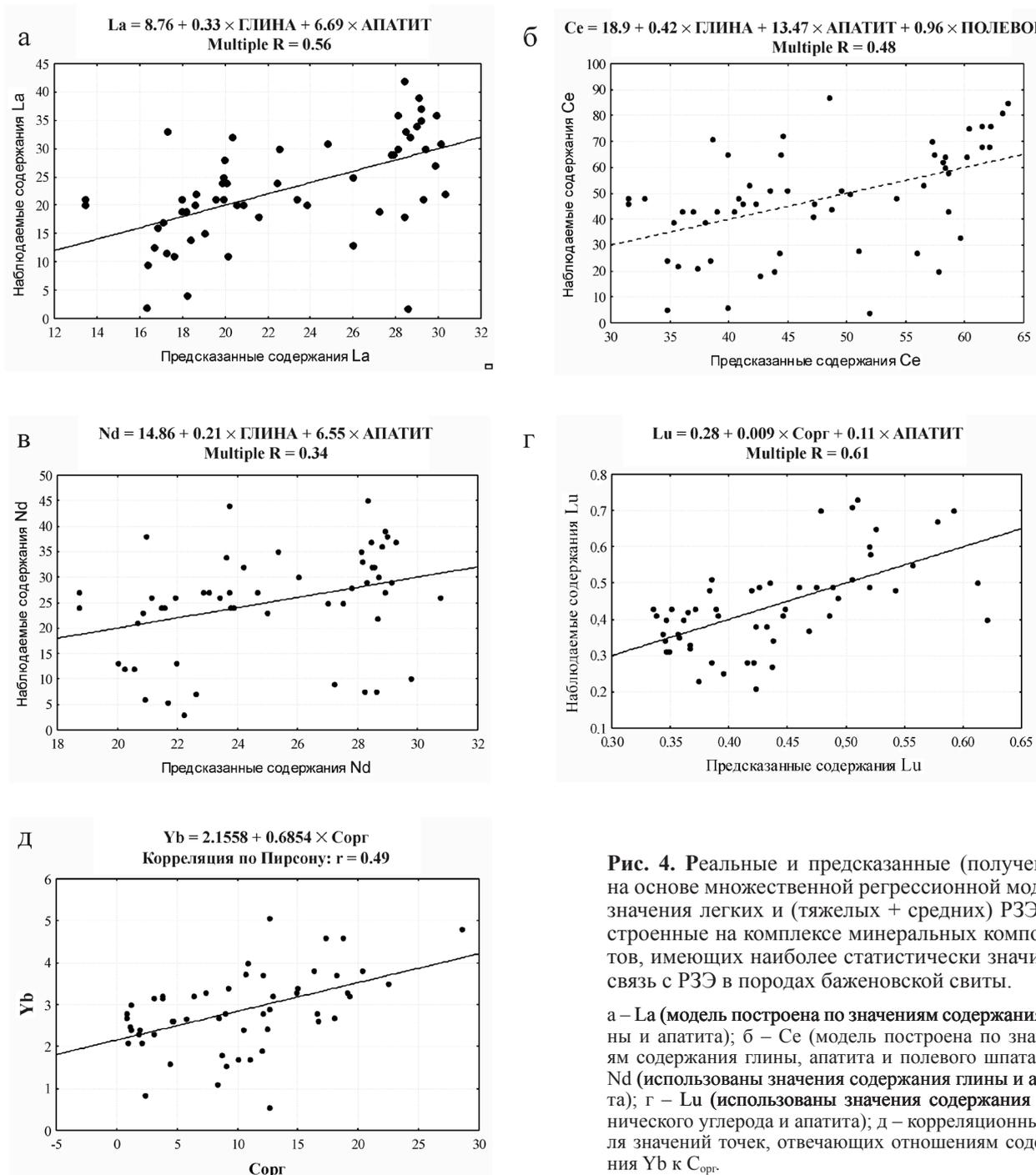


Рис. 4. Реальные и предсказанные (полученные на основе множественной регрессионной модели) значения легких и (тяжелых + средних) РЗЭ, построенные на комплексе минеральных компонентов, имеющих наиболее статистически значимую связь с РЗЭ в породах баженовской свиты.

а – La (модель построена по значениям содержания глины и апатита); б – Ce (модель построена по значениям содержания глины, апатита и полевого шпата); в – Nd (использованы значения содержания глины и апатита); г – Lu (использованы значения содержания органического углерода и апатита); д – корреляционные поля значений точек, отвечающих отношениям содержания Yb к $C_{\text{Сорг}}$.

сутствием негативной аномалией по Ce. Исключением является обр. 123-18 фосфатной глинисто-кремнистой породы ($Ce/Ce^* = 0.84$, табл. 2, рис. 5д), в котором проявлена эта аномалия. Отсутствие негативной аномалии по Ce в породах принято связывать с восстановительными условиями их формирования [41]. Eu проявляет очень слабую положительную или также очень слабую отрицательную аномалии в глинисто-кремнистых

породах (рис. 5а, б) и аргиллитах (рис. 5г). Заметная отрицательная аномалия по Eu выявляется в образце 51-40 алевритового аргиллита аномального разреза ($Eu/Eu^* = 0.73$, табл. 2, рис. 5ж), тогда как для образца 51-39 того же разреза, представленного глинисто-алевритовой породой, по Eu наблюдается положительная аномалия ($Eu/Eu^* = 1.29$, табл. 2, рис. 5ж). Мы связываем эти различия с условиями окислительно-восстановительных

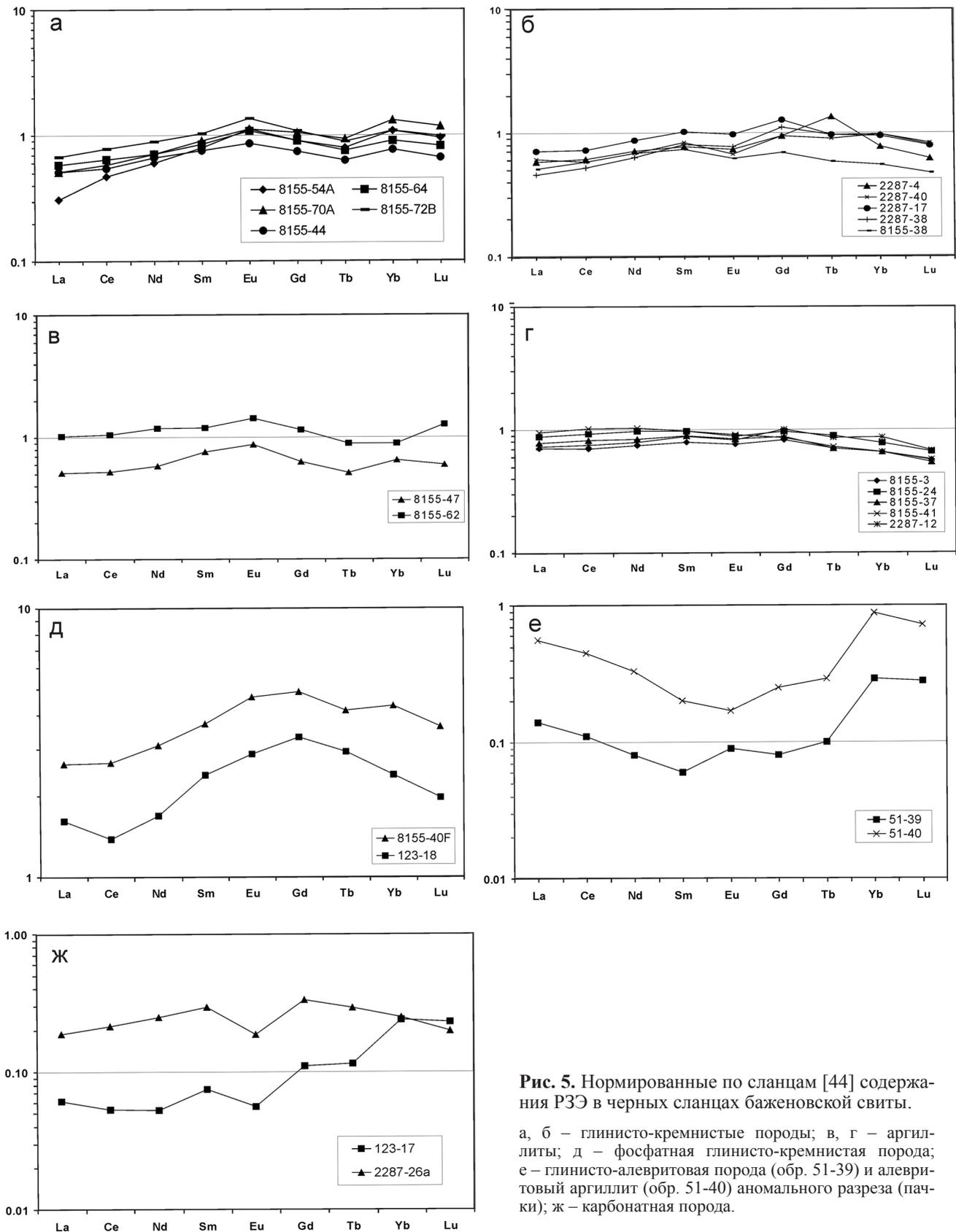


Рис. 5. Нормированные по сланцам [44] содержания РЗЭ в черных сланцах баженовской свиты.

а, б – глинисто-кремнистые породы; в, г – аргиллиты; д – фосфатная глинисто-кремнистая порода; е – глинисто-алевритовая порода (обр. 51-39) и алевритовый аргиллит (обр. 51-40) аномального разреза (пачки); ж – карбонатная порода.

обстановок формирования этих пород: для первых они были более окислительными (СП = 0, табл. 1), чем для вторых (СП = 0.20). Повышенная негативная аномалия по Eu наблюдается в образцах карбонатных пород 123-17 и 2287-26а (Eu/Eu* = 0.60, табл. 2, рис. 5ж).

МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЗЭ В БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЕ

Может быть выделено шесть типов моделей распределения РЗЭ, отвечающих основным типам пород баженовской свиты и условиям их формирования. Такими породами в свите являются:

1. Фосфатные глинисто-кремнистые породы нормальных разрезов.
2. Аргиллиты нормальных разрезов.
3. Глинисто-кремнистые породы нормальных разрезов.
4. Карбонатные породы (доломиты) нормальных разрезов.
5. Алевритистые аргиллиты аномальных разрезов (пачек).
6. Глинисто-алевритовые породы аномальных разрезов (пачек).

Детальная характеристика моделей (табл. 5) определяется показателями, приведенными в предыдущих разделах. Было показано, что общее содержание РЗЭ и отдельно легких и суммарно средних и тяжелых РЗЭ и их соотношение связаны с составом пород (прежде всего с содержанием глинистых минералов, пирита, апатита, карбонатных минералов и органического углерода), типом осадочной системы, темпом седиментации и окислительно-восстановительными условиями формирования. Эти факторы имеют неоднозначное влияние на содержание РЗЭ. В некоторых случаях содержание РЗЭ зависит в первую очередь от состава пород. Так, в нормальных разрезах повышенное содержание РЗЭ определяется повышенным содержанием апатита (до 7.13%) в первой модели и глинистых минералов (в среднем 50.90%) – во второй, а наиболее низкое содержание этих элементов в четвертой модели ассоциируется с карбонатным составом породы. Сходная картина наблюдается в аномальной пачке, где породы, отвечающие пятой модели, существенно обогащены глинистыми минералами (51.21%) по сравнению с породами шестой пачки (21.52%, что отвечает и концентрации РЗЭ в этих породах. В породах, обогащенных органическим углеродом и пиритом (модели первая и третья) отношение содержаний легких РЗЭ к сумме средних и тяжелых ниже, чем в породах, обедненных этими компонентами (все другие модели), т.е. взаимосвязь здесь обратная. Темп седиментации является вторым фактором, определяющим концентрацию РЗЭ в породах свиты. Именно он ответствен за низкую концентрацию РЗЭ в породах ано-

Таблица 5. Модели распределения РЗЭ в баженовской формации

№	Типы пород	Содержание				ΣЛРЗЭ Σ(C+T) РЗЭ	Обстановки формирования осадка	Окислительно-восстановительные условия	Темп седиментации	
		РЗЭ, г/т	C _{опыт} , %	глина, %	пирит, %					апатит, %
1	фосфатные глинисто-кремнистые	367.95 + 49.9 417.85	17.10	13.22	13.22	7.13	13.10	7.37	высоко восстановительные	медленный
2	аргиллиты нормальных разрезов	130.73 + 9.71 140.44	2.49	50.90	4.48	0.48	2.92	13.46	умеренно восстановительные	пониженный
3	глинисто-кремнистые породы нормальных разрезов	85.97 + 11.45 97.42	13.51	20.66	9.52	0.58	10.79	7.51	высоко восстановительные	медленный
4	карбонатные породы нормальных разрезов	23.23 + 2.83 26.04	2.92	6.49	5.09	0.35	77.69	8.21	умеренно восстановительные	–
5	алевритистые аргиллиты аномальных разрезов	78.7 + 5.96 84.66	0.61	51.21	0.97	0.59	1.90	13.35	от окислительных до слабо-восстановительных	быстрый
6	глинисто-алевритовые породы аномальных разрезов	19.66 + 1.54 21.20	0.24	21.52	1.02	0.39	27.30	12.77	от окислительных до слабо-восстановительных	быстрый

Примечание. Числитель – легкие РЗЭ (La, Ce, Nd, Sm) + средние и тяжелые РЗЭ (Eu, Gd, Tb, Yb, Lu), знаменатель – сумма РЗЭ.

мальных разрезов (пятая и шестая модели), которые характеризуются более быстрым темпом седиментации по сравнению с нормальными разрезами. В противоположность этому, в нормальных разрезах повышенные концентрации РЗЭ в породах модели второго типа, по сравнению с породами модели третьего типа, связаны с повышенным содержанием глинистого материала в первом случае, хотя темп седиментации при формировании отложений модели третьего типа был медленнее, чем второго. Как видно, в этом случае состав пород явился здесь более важным фактором концентрации РЗЭ, чем темп седиментации. Взаимосвязь окислительно-восстановительных обстановок формирования отложений с концентрацией РЗЭ также неоднозначна. В целом, породы моделей с существенно более низкими показателями степени пиритизации железа (СП) аномального разреза (0.09–0.20) в сравнении с породами нормальных разрезов (0.46–0.94) характеризуются также и более низкими содержаниями РЗЭ. В то же время в нормальных разрезах породы второй модели с более низкими значениями СП (0.46), по сравнению с третьей моделью (0.82), характеризуются более высоким содержанием РЗЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Наблюдается следующий порядок возрастания суммарного содержания РЗЭ в породах баженовской свиты: глинисто-алевритовая порода аномального разреза (пачки) (21.20 г/т) < доломит (26.04 г/т) < алевритистый аргиллит аномального разреза (пачки) (84.66 г/т) < глинисто-кремнистая порода (97.42 г/т) < аргиллит (140.44 г/т) < фосфатная глинисто-кремнистая порода (417.85 г/т). Эта неоднородность в содержании РЗЭ зависит от ряда факторов, таких как состав пород, темп седиментации и частично окислительно-восстановительный потенциал обстановок формирования пород. Тем не менее, содержание РЗЭ в главных типах пород свиты – глинисто-кремнистых породах и аргиллитах нормальных разрезов – соответствует содержанию их в черносланцевых отложениях других регионов и возраста.

2. Устанавливается следующая последовательность минеральных компонентов пород свиты по возрастанию интенсивности связи с ними РЗЭ: полевой шпат (?)–пирит–органический углерод–глина–апатит (при содержании >3%). Указанное содержание апатита в породах свиты является весьма редким, и в качестве главного концентратора РЗЭ в свите рассматриваются глинистые минералы. По данным ранговой корреляции Спирмена, глинистые минералы и полевые шпаты ответственны за концентрацию прежде всего легких РЗЭ, тогда как средние и тяжелые РЗЭ концентрируются преимущественно органическим углеродом и пиритом. При этом Yb и Lu концентрируются органическим

углеродом в большей степени, чем пиритом.

3. Влияние темпа седиментации на содержание РЗЭ в породах баженовской свиты неоднозначно. Высокому темпу седиментации, с которым связано формирование отложений аномальных разрезов (пачек), отвечает наиболее низкое содержание РЗЭ в глинисто-алевритовой породе. С другой стороны, более высокому темпу седиментации материала аргиллитов нормальных разрезов, в сравнении с глинисто-кремнистыми породами, отвечает повышенное, а отнюдь не пониженное содержание РЗЭ, т.е. на первое место здесь выходит состав пород, а не темп седиментации.

4. Анализ данных по средним содержаниям РЗЭ в нормальных разрезах баженовской свиты выявляет существенные различия не только между отдельными типами пород, но также между площадями в пределах морского бассейна, а в некоторых случаях – для различных интервалов одного и того же разреза.

5. Наблюдается широкий разброс показателей окислительно-восстановительного режима при формировании пород баженовской свиты. Среднее значение величины степени пиритизации железа (СП) для отдельных типов пород колеблется от 0.19 до 0.94. Однако, эти вариации не оказывали существенного влияния на содержание РЗЭ в породах свиты.

6. Нормализация по сланцам значений содержания РЗЭ в породах свиты показала отсутствие или лишь слабое проявление отрицательной аномалии по Се для пород, и связано с восстановительными условиями их формирования. Для Eu в большинстве случаев отмечаются слабые положительные и отрицательные аномалии. Существенная отрицательная аномалия по этому элементу отмечается для карбонатных пород нормальных разрезов и образцу алевритового аргиллита аномального разреза, характеризующихся пониженным значением степени пиритизации железа.

Авторы приносят искреннюю благодарность И.М. Фоминых, Л.А. Горчуковой и А.Д. Кирееву за химические анализы фосфоритов, В.А. Пархоменко за определение содержания РЗЭ, Г.П. Турковой за анализ содержания органического углерода, В.А. Казаненкову, предоставившему нам часть исследованного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженовский горизонт Западной Сибири (Стратиграфия, палеогеография, экосистема, нефтеносность) / Ю.В. Брэдучан, Ф.Г. Гольберг, Ф.Г. Гулари и др. Новосибирск: Наука, 1986. 217 с.
2. Гаврилов Ю.О. Закономерности накопления и распределения органического вещества в осадках и осадочных породах // Осадочные бассейны: методика изучения, строение и эволюция / Ред. Ю.Г. Леонов, Ю.А. Волож. М.: Научный мир, 2004. С. 94–106.

3. *Гавшин В.М., Гурари Ф.Г.* Геохимия сланценосных формаций Сибири // Геология угленосных и горючсланцевых формаций Сибири. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1987. С. 50–56.
4. *Гавшин В.М., Захаров В.А.* Баженовиты на Норвежском континентальном шельфе // Геология и геофизика. 1991. № 1. С. 62–70.
5. *Гавшин В.М., Созинов Н.А.* Геохимия черных сланцев верхнего докембрия и нижнего кембрия Пхеннамского прогиба // Геология и геофизика. 1991. № 7. С. 43–51.
6. *Гуляева Л.А.* Осадки сероводородных бассейнов геологического прошлого // Докл. АН СССР. 1953. Т. СХVII, № 5. С. 1019–1022.
7. *Гурари Ф.Г., Вайц Э.Я., Меленевский В.Н. и др.* Условия формирования и методика поисков залежей нефти в аргиллитах баженовской свиты. М.: Недра, 1988. 199 с.
8. *Гурова Т.И., Казаринов В.П.* Литология и палеогеография Западно-Сибирской низменности в связи с нефтеносностью. Л.: Гостоптехиздат, 1962. 298 с.
9. *Дорофеева Т.В., Краснов С.Г., Лебедев Б.А. и др.* Коллекторы нефти баженовской свиты Западной Сибири. Л.: Недра, 1983. 131 с.
10. *Дубинин А.В.* Редкоземельные элементы в процессах раннего диагенеза осадков Тихого океана // Литология и полезные ископаемые. 1998. № 4. С. 346–354.
11. *Занин Ю.Н., Замирайлова А.Г., Меленевский В.Н., Давыдов Д.Ю.* О двух вещественно-генетических типах черных сланцев баженовской свиты // Докл. АН. 1999. Т. 368, № 1. С. 91–94.
12. *Занин Ю.Н., Замирайлова А.Г., Фомин А.Н.* Катагенез и геохимия редкоземельных элементов фосфоритов куонамской формации кембрия Сибирской платформы // Геохимия. 2002. № 7. С. 773–780.
13. *Занин Ю.Н., Замирайлова А.Г., Эдер В.Г.* Некоторые аспекты формирования баженовской свиты в центральных районах Западно-Сибирского осадочного бассейна // Литосфера. 2005. № 4. С. 118–135.
14. *Захаров В.А., Сакс В.Н.* Баженовское (волжско-берриасское) море Западной Сибири // Палеобиогеография и биостратиграфия юры и мела Сибири / Отв. ред. В.А. Захаров. М.: Наука, 1983. С. 5–32.
15. *Зубков М.Ю.* Состав строение и условия образования пород баженовской и абалакской свит центральной части Красноленинского свода (Западная Сибирь) // Литология и полезные ископаемые. 2001. № 1. С. 37–48.
16. *Зубков М.Ю., Доронина Н.А.* Геохимия пород баженовской свиты // Доманикиты Сибири и их роль в нефтегазоносности. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1982. С. 68–76.
17. *Конторович А.Э.* Геохимия верхнеюрских отложений Западно-Сибирской плиты // Литология и полезные ископаемые. 1967. № 3. С. 90–101.
18. *Конторович А.Э.* Геохимические методы количественного прогноза нефтегазоносности. М.: Недра, 1976. 249 с.
19. *Конторович А.Э., Меленевский В.Н., Занин Ю.Н. и др.* Литология, органическая геохимия и условия формирования основных типов пород баженовской свиты (Западная Сибирь) // Геология и геофизика. 1998. № 11. С. 1477–1491.
20. *Конторович А.Э., Нестеров И.И., Салманов Ф.К. и др.* Геология нефти и газа Западной Сибири. М.: Недра, 1975. 679 с.
21. *Нестеров И.И., Ушатинский И.Н.* Особенности терминологии и классификации битуминозных пород // Строение и нефтегазоносность баженовской Западной Сибири // Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 1985. С. 19–26.
22. *Плуман И.И.* Ураноносность черных аргиллитов волжского яруса Западно-Сибирской плиты как критерий геохимических условий осадконакопления // Геохимия. 1971. № 9. С. 1138–1143.
23. *Плуман И.И.* Распределение урана, тория и калия в отложениях Западно-Сибирской плиты // Геохимия. 1975. № 5. С. 756–767.
24. *Розен О.М., Нустратов Ю.А.* Определение минерального состава осадочных пород по химическим анализам // Советская геология. 1984. № 3. С. 76–83.
25. *Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М.* Континентальная кора, ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 379 с.
26. *Холодов В.Н., Недумов Р.И.* Роль органического вещества на ранней стадии формирования “черных сланцев” // Седикахиты на разных этапах литогенеза. М.: Наука, 1982. С. 135–147.
27. *Ушатинский И.И.* Состав и микроэлементы пород баженовской свиты и вмещающих глин // Ассоциация микроэлементов с органическим веществом в осадочных толщах Сибири. Новосибирск: Институт геологии и геофизики СО АН СССР, 1984. С. 21–31.
28. *Ушатинский И.И., Зарипов О.Г.* Минералогические и геохимические показатели нефтегазоносности мезозойских отложений Западно-Сибирской плиты. Свердловск: Средне-Уральское кн. изд-во, 1978. 207 с.
29. *Шурыгин Б.Н., Никитенко Б.Л., Девятов В.П. и др.* Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Юрская система. Новосибирск: Гео, 2000. 480 с.
30. *Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Элементы-примеси в черных сланцах. Екатеринбург: УИФ Наука, 1994. 304 с.
31. *Ясович Г.С.* Перспективы нефтегазоносности зон развития аномальных разрезов баженовской свиты Среднего Приобья // Геолого-геохимические условия формирования зон нефте- и газонакопления в мезозойских отложениях Западной Сибири. Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 1981. С. 51–59.
32. *Coppin F., Berger G., Bauer A. et al.* Sorption of lanthanides on smectite and kaolinite // Chem. Geol. 2002. V. 182. P. 57–68.
33. *Cruse A.M., Lyons T.W., Kidder D.L.* Rare-earth element behavior in phosphates and organic-rich host shales: an example from the Upper Carboniferous of Mid-continent North America // SEPM Special Publication. 2000. № 66. P. 445–453.
34. *Gavshin V.M.* Sea water as a source of metals in black shale // Source, Transp. and Deposit. Metals: Proc. 25 Years SGA Anniv. Meet. Nancy. Brookfield, Rotterdam, 1991. P. 517–520.
35. *Gavshin V.M., Zakharov V.A.* Geochemistry of the Upper Jurassic–Lower Cretaceous Bazhenov Formation, West Siberia // Econ. Geol. 1996. V. 91. P. 122–133.
36. *Hannigan R., Basu A.R.* Late diagenetic trace elements remobilization in organic-rich black shale of the Taconic Foreland Basin in Québec, Ontario and New York // Shales and Mudstones, II / J. Schieber, W. Zimmerle, P.S. Sethi, eds. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagbuchhandlung (Nägel und Obermiller), 1998. P. 209–234.

37. *Haskin L., Gehl M.A.* The rare-earth distribution in sediments // *J. Geophys. Res.* 1962. V. 67, № 6. P. 2537–2541.
38. *Huyck H.L.O.* When is a metalliferous black shale not a black shale? // *Metalliferous Black Shales and Related Ore Deposits – Proceedings, 1989 United States Working Group Meeting, International Geological Correlation Project 254 / U.S. Geol. Survey Circular 1058.* 1991. P. 42–56.
39. *Jarvis I.* Rare Earth element geochemistry of Late Cretaceous chalks and phosphorites from Northern France // *Spec. Publ. Geol. Surv. India.* 1984. № 17. P. 179–190.
40. *Jarvis I., Burnett W.C., Nathan Y. et al.* Phosphorite geochemistry: State-of-the-art and environmental concerns // *Ecolgae Geol. Helv.* 1994. V. 87 (3) P. 643–700.
41. *McArthur J.M., Walsh J.N.* Rare-earth geochemistry of phosphorites // *Chem. Geol.* 1984. V. 47. P. 191–120.
42. *Milodowski A.E., Zalasiewicz J.A.* Redistribution of rare-earth elements during diagenesis of turbidite / hemipelagite mudrock sequences of Llandovery age from central Wales // *Geol. Soc. Spec. Publ.* 1991. V. 57. P. 101–124.
43. *Murray R.W., Buchholtz ten Brink M.R., Jones D.L. et al.* Rare-earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale // *Geology.* 1990. V.18. P. 268–271.
44. *Piper D.Z.* Rare-earth elements in sedimentary cycle: a summary // *Chem. Geol.* 1974. V. 14. P. 285–304.
45. *Piper D.Z., Calvert S.E.* A marine biogeochemical perspective on black shale deposition // *Earth-Sci. Rev.* 2009. V. 95. P. 63–96.
46. *Raiswell R., Buckley F., Berner R.A., Anderson T.F.* Degree of pyritization of iron as a paleoenvironmental indicator of bottom-water oxygenation // *J. Sediment. Petrol.* 1988. V. 58. P. 812–819.
47. *Tait L.* The character of organic matter and the partitioning of trace and rare earth elements in black shales; Blondeau Formation, Chibougamau, Québec // *Université du Québec à Chicoutimi. Mémoire. Presente A.* 1987. P. 1–494.
48. *Vine J.D., Tourtelot E.B.* Geochemistry of black shales: A summary report // *Econ. Geol.* 1970. V. 65. P. 253–272.
49. *Zanin Yu.N., Eder V.G., Zamirailov A.G.* Composition and formation environments of the Upper Jurassic–Lower Cretaceous black shale Bazhenov Formation (the central part of the West Siberian Basin) // *Marine and Petroleum Geology.* 2008. V. 25. P. 289–306.

Рецензент А.В. Маслов

Rare-earth elements in the Bazhenov formation of the West-Siberian sedimentary basin

Yu. N. Zanin, A. G. Zamirailova, V. G. Eder, V. G. Krasavchikov

Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS

The distribution of the Rare-Earth Elements (REE) in the black shale Bazhenov Formation of the Upper Jurassic (Turonian Stage)–Lower Triassic (Berriassian Stage) of the West Siberian sedimentary basin is studied. It has been found out that such factors as the composition of rocks, the rate of sedimentation and redox potential are responsible for the concentration of REE in the Formation. Clay minerals and especially sedimentary apatite concentrate REE more actively than organic matter and pyrite. The clay accumulate mainly light REE whereas pyrite and organic matter concentrate middle and heavy ones. In the last case Yb and Lu are accumulated by organic matter more actively than by pyrite. In some cases, the rapid rate of sedimentation, rather than rocks composition, determines the low REE content in them. The redox potential of Bazhenov Formation origin condition is less significant to the REE content than the composition and rate of sedimentation of rocks.

Key words: *West Siberia, Upper Jurassic–Low Cretaceous, Bazhenov Formation, black shale, rare-earth elements.*